九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

直線翼垂直型風車への風レンズの適用

渡邉, 康一
九州大学工学府航空宇宙工学専攻 : 博士課程

大屋, 裕二
九州大学応用力学研究所

烏谷, 隆
九州大学応用力学研究所

https://doi.org/10.15017/1660015

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 149, pp.36-41, 2015-09. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

九州大学応用力学研究所所報 第149号 (36 - 41) 2015年9月

直線翼垂直軸型風車への風レンズの適用

渡邉 康一*1 大屋 裕二*2 烏谷 隆*2

(2015年8月31日受理)

Application of a Wind Acceleration Device to Vertical Axis Wind Turbines

Koichi WATANABE, Yuji OHYA, Takashi KARASUDANI
E-mail of corresponding author: *koichi-watanabe@riam.kyushu-u.ac.jp*

Abstract

We applied a wind acceleration device (wind-lens) to Vertical Axis Wind Turbines (VAWT), and examined power augmentation effects by wind tunnel experiments. We have investigated the optimum parameters of the wind-lens configuration. A wind-lens consists of a diffuser and brim. The increase in diffuser semi-open angle makes it possible to generate higher power output over a wide range of tip speed ratios. There is an optimum semi-open angle of diffuser. The inlet enhances power augmentation over a wide range of tip speed ratios. The best location of a wind-lens in the streamwise direction is in the center of VAWT. The curved surface type diffuser is more effective for power augmentation than flat panel type diffusers. The wind-lens demonstrates power augmentation with a curved surface diffuser by a factor of about 2.1 compared with a bare wind turbine.

Keywords: *vertical axis wind turbine, wind acceleration device, wind tunnel experiment*

1. 緒 言

風力による発電量は風速の3乗に比例する。したがって風車にあたる風速を少しでも速くできれば大きな出力増加をもたらす．大屋らはこの性質を利用し，風車の周りに風を集めて加速するつば付きベンチュリ形状の集風加速装置（風レンズと呼ぶ）を設置することで，風車の発電量を飛躍的に向上させた[1),2)]．風レンズはこれまで水平軸型風車に適用されてきたが，垂直軸型風車に適用しても，同じ原理により出力を増加させられるはずである．

本論文では，風レンズを垂直軸型風車に適用して風洞実験を行い，風車単体の2倍以上の出力増加を得たので，その結果を示す．実験では，風レンズの形状，及び風車との主流方向の相対位置を変化させ，効果的に出力を増加させる風レンズの形状を探った．また，風車の翼枚数，翼型，及び翼コード長を変化させ，風車の形状が変化した場合にも同様に出力増加効果が得られることを確認した．加えて，実験のレイノルズ数を変化させ，風レンズ適用風車の出力のレイノルズ数依存性について調べた．

2. 風 洞 実 験 法

実験に用いた風洞は九州大学応用力学研究所の大型境界層風洞である．3.6m幅×2m高さ×15m長さの測定部を有し，最大風速は30m/sである．実験の際，風車及び風レンズによるブロッケージの影響を防ぐため，主流方向長さ6mにわたり天井，及び両側壁を解放し，セミオープンの測定部とした．実験に用いた風車は，ブレード，支持アームともに木製で，ブレード長さℓ，回転直径D_{wt}は0.7mである（Fig.1）．写真に示す通り風車は直線翼であり，翼のコード長は主にc=0.15m，一部の実験ではc=0.1mのものを用いた．翼型は主にNACAの対象翼を用い，一部の実験では円弧翼を用いた．Fig.1のように座標系を定義したとき，風車は中心が床面からの高さz=0.7mとなるように設置した．

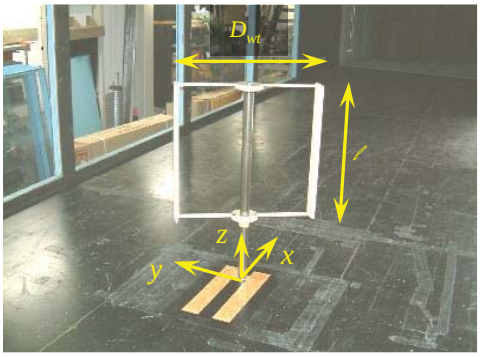

Fig.1 Vertical axis wind turbine used in the wind tunnel experiment

＊1 九州大学工学府航空宇宙工学専攻博士課程
＊2 九州大学応用力学研究所

実験では，風車に非接触トルク計（定格0.5N・m）を接続し，無負荷から徐々に負荷をかけた状態での風車のトルクQ（N・m），および回転数n（Hz）を計測し，発電量P（W）＝Q・$2\pi n$を算出して出力性能曲線を求めた．

3. 平面型風レンズの適用

3.1 風レンズの形状

風車の周りにFig.2に示すような，鉛直方向に同一の断面をもち，ディフューザ部が平面形状の風レンズ（平面型風レンズと呼ぶ）を設置し，ディフューザ長さL，つばの幅h，及びディフューザ開き角ϕを変化させて，出力性能の変化を調べた．風レンズはアルミパイプで補強したウッドラック板を用いて製作した．スロート部の幅D＝0.8m，高さW＝1.79Dとし，鉛直方向に風車単体を十分に覆う形状とした．

本章の実験では，風車は2枚翼，コード長c=0.15m，翼型はNACA0018，前縁よりコード長40%の位置でアーム支持する形状の風車を用いた．

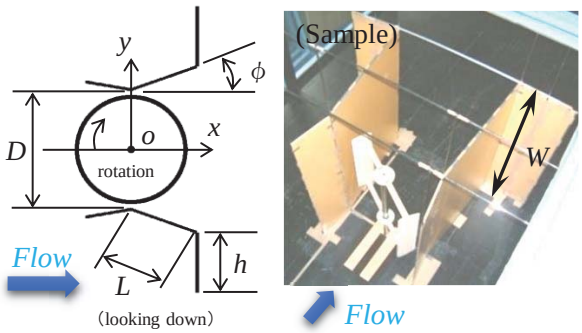

Fig.2 Configuration of wind-lens
（Sample : L=1.14D, φ=10°，h=0.5D）

3.2 ディフューザ開き角ϕとつばの幅hの効果

Fig.3にϕとhを変化させた場合の出力性能曲線を示す．ディフューザ長さはL=1.14D，風レンズのスロート位置は風車中心(x=0)とした．グラフの横軸は周速比λ，縦軸は出力係数C_p(=P/(0.5 ρ U_0^3A, 風車ローターの回転面積 A=ℓ D_{wt})である．実験はϕ=10°，15°，20°，h=0.25D，0.5Dで行った．測定の結果，出力はϕやhが大きいほど増加し，ϕ=20°，h=0.5Dのとき，風車単体の2.6倍の出力増加が得られた．また，特にh=0.25Dの場合の出力曲線にて顕著であるが，ϕが大きくなるにつれて，高い出力を発揮する周速比領域が拡大する傾向が見て取れる．このことから，ディフューザ開き角ϕを大きくすることは最大出力を増加させるのみならず，高い出力が得られる周速比範囲を拡大する効果があるといえる．ちなみに，風レンズ構造体の主流方向の投影面積が等しい組み合わせ*1で出力曲線を比較すると，λ>2では出力曲線はほぼ一致するが，λ≤2では，同じ投影面積でも，つばの幅の割合が小さく，ディフューザ

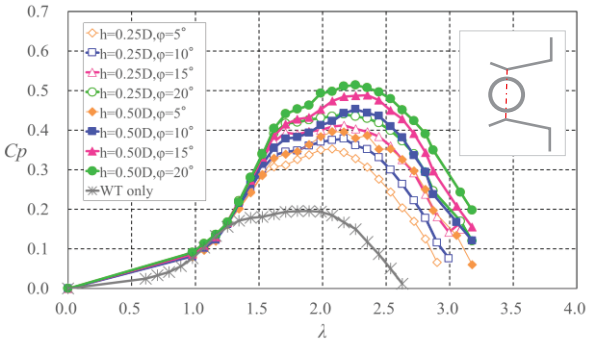

Fig.3 Power coefficients C_p of various wind-lens turbines *vs.* tip-speed ratio λ. (The diffuser length L=1.14D)

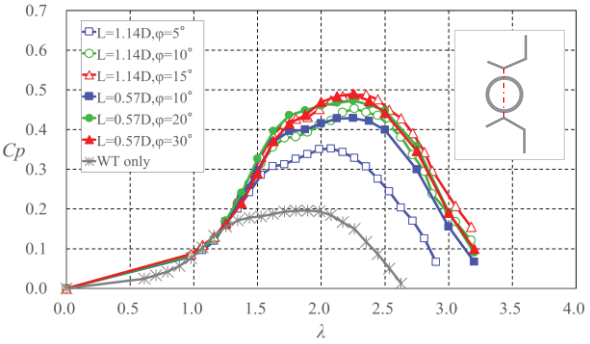

Fig.4 Power coefficients C_p of various wind-lens turbines *vs.* tip-speed ratio λ. (The brim width h=0.5D)

開きの割合が大きな風レンズを適用した風車の方が出力が高い．この結果はすなわち，ディフューザ長さが一定で，主流方向に同じ大きさの風レンズを適用する場合，ディフューザ開きが大きいものを選んだ方が，より広い周速比範囲にて高い出力が得られることを示す．

3.3 ディフューザ長さLの効果

前項にて，ディフューザ開き角ϕが出力に与える効果について述べたが，ディフューザ長さLを短くすれば，主流方向の投影面積を大きくすることなく，ϕを大きくすることができる．そこで，Lを前項の半分の長さのL=0.57Dとして実験を行った．h=0.5D，ϕ=10°，20°，30°での結果をFig.4に示す．主流方向に同じ投影面積を持つL=1.14Dの風レンズの出力曲線と比較する*2と，最大出力は増加し，高い出力が得られる周速比領域も拡大する傾向が見られた．ただし，ϕ=30°になるとϕの拡大による出力増加は頭打ちとなり，最適周速比付近を除く周速比領域では，ϕ=20°の場合

＊1 h=0.25D，ϕ=15°とh=0.5D，ϕ=5°を比較した場合，及びh=0.25D, ϕ=20°とh=0.5D, ϕ=10°を比較した場合がほぼ等しい．

＊2 L=0.57Dのϕ=10°，20°，30°は，L=1.14Dのϕ=5°，10°，15°と主流方向の投影面積がそれぞれほぼ等しい．

よりも出力が低下した．この結果から，つばの幅が一定で，主流方向に同じ大きさの風レンズを適用する場合，ディフューザ長さが短く，開き角が大きなものを選んだ方が，より広い周速比範囲にて高い出力が得られ，最大出力も増加する，ただし開き角 ϕ には最適な上限値がある，と言える．

3.4　インレットの効果

ベンチュリ形状の風レンズから，インレット部を脱着して出力性能実験を行い，インレットの効果を調べた．用いた風レンズは，ϕ=20°，L=0.57D，h=0.5Dである．Fig.5に出力曲線を示す．最大出力に大きな差は見られないが，インレットがない場合，高い出力が発揮できる周速比域が狭くなった．この傾向は，h=0.25Dの場合も同様であった．このことから，インレットは高い出力を発揮する周速比範囲を拡大する役割を果たしている，と言える．

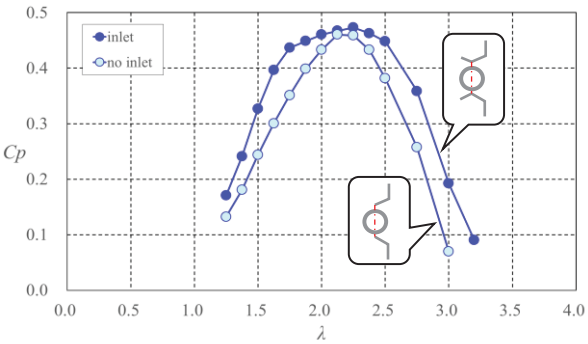

Fig.5 Effect of the inlet to power coefficient C_p.

3.5　風レンズと風車の相対位置

つば付きベンチュリ形状の構造体である風レンズは，スロート部で最も風を増速させる[3]．よって，水平軸型風車に適用する場合は，スロート部に風車回転面を設置することで大きな効果が得られる．しかし，垂直軸型風車は風車回転面が主流方向に幅をもつため，増速部であるスロートを風車のどこに位置させるのが出力増加に効果的であるかを調べる必要がある．そこで，風車に対する風レンズの相対位置を，主流方向に変化させて出力性能の変化を調べた．風レンズのスロート部を風車前面(x=-D_{wt}/2=-0.35m)，中心(x=0m)，及び後面(x=0.35m)に位置させた場合のそれぞれの結果をFig.6に示す．用いた風レンズはL=1.14D，h=0.5D，ϕ=15°である．スロート部が風車中心に位置する場合に最も高い出力が得られた．スロート部が風車前面にある場合は，広い周速比領域で出力を発揮するものの，最大出力は最も低い．スロート部が風車後面にある場合は，風車前面の場合より最大出力が幾分改善されるものの，風車中心の場合には及ばず，最大出力を発揮する周速比領域は非常に狭い．風車後面の場合の出力曲線は，インレットがない場合の出力曲線の形状とよく似ており，風車に対し風レンズを下流側に設置したことで，インレットの効果が得られていないことが原因の一つとして考えられる．

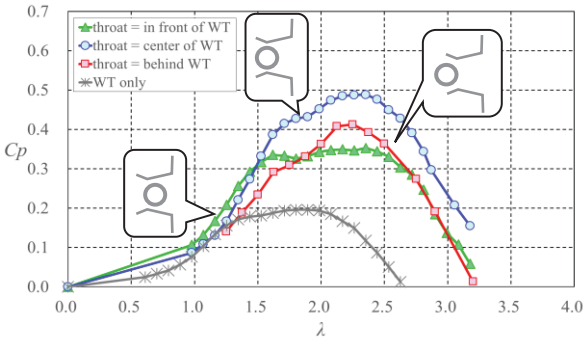

Fig.6 Power coefficients C_p of various wind-lens turbines *vs.* tip-speed ratio λ.
(The diffuser length L=1.14D, the brim width h=0.5D, the semi-open angle of diffuser ϕ=15°)

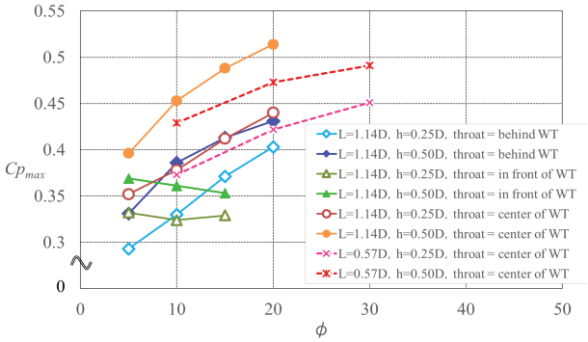

Fig.7 Maximum power coefficients Cp_{max} of various wind-lens turbines *vs.* semi-open angle of diffuser ϕ.

Fig.7に種々の形状の風レンズを適用し，ϕを変化させたときの最大出力Cp_{max}の変化をまとめた．スロート部が風車中心と風車後面にある場合は，ϕが大きくなるにつれて出力が増加したのに対し，スロート部が風車前面に位置する場合は，ϕが大きくなるにつれ，出力が低下する結果となった．ϕを大きくするにつれて風レンズの集風効果が高まることは他の相対位置の結果から明らかであるが，それにもかかわらず出力が低下するのは，スロートが風車前面にある場合，ϕを大きくすると風車とディフューザの間の隙間が大きくなり，風が風車の脇の拡大した隙間に逃げることが原因であると考えられる．以上の結果より，垂直軸型風車に風レンズを適用する場合，スロート部が風車中心に位置するように設置するのが最も効果的であることが分かった．

4.　曲面型風レンズの適用

平面型の風レンズのディフューザ開きϕを大きくしていくと出力は増加するが，あるϕ以上では出力増加は頭打ちとなり，高い出力を発揮する周速比領域も狭くなることをFig.4

で示した．これを防ぎながら，さらなる出力増加を目指すため，ディフューザの開き角が連続的に拡大する曲面型の風レンズを適用し，出力性能実験にて出力の変化を調べた．

Fig.8に曲面型風レンズの概要を示す．ϕ=20°，L=0.57Dの平面型風レンズのつばの幅を半分とし，その分ディフューザの開きを大きくしている．風レンズは木板で補強したアクリル板を用いて製作した．スロート部の幅D＝0.8m，鉛直方向長さW＝1.79Dである．なお，前章までは前縁よりコード長40%の位置でアーム支持する風車を用いたが，高橋らの実験で50%の位置で支持した方が高い出力が得られる[4]ことが分かったため，以降50%位置で支持する風車を用いた．用いた翼型はNACA0018，c=0.15mである．

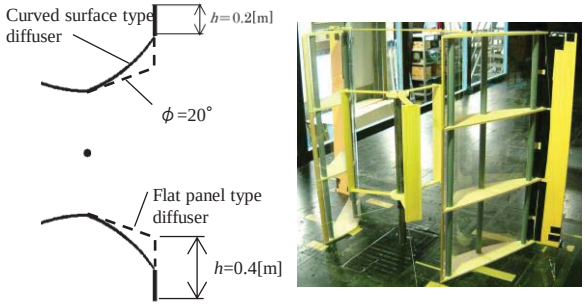

Fig.8 Configuration of wind-lens with curved surface type diffuser.

Fig.9に曲面型風レンズ適用風車の出力性能曲線を示す．ディフューザ形状を曲面型にしたことで，全ての周速比領域にて平面型風レンズよりも高い出力増加を得た．風車単体に対しては2.1倍の出力増加を達成した．以上より，ディフューザを曲面型にすることは，広い周速比範囲にてより高い出力を得るのに効果的であることが分かった．

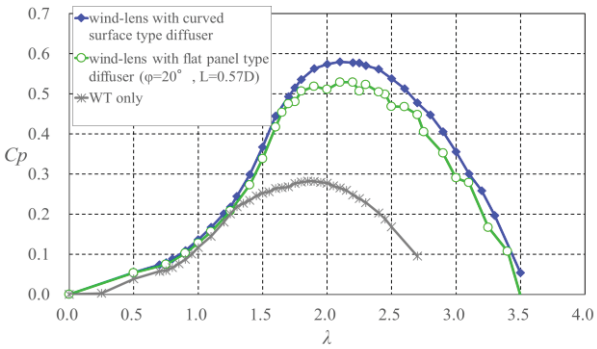

Fig.9 Power coefficients C_p of wind-lens turbines vs. tip-speed ratio λ.
(Curved surface type diffuser, the brim width h=0.25D)

5. 風車形状を変化させた場合の出力変化

本章では，L=0.57D，h=0.5D，ϕ=20°の平面型風レンズを用い，風車の翼枚数，翼型，及びコード長を変化させ，そのときの風車単体出力の変化と，風レンズを適用した際の効果を検証した．

5.1 翼枚数を変化させた場合

Fig.10に翼枚数を2枚と3枚で変化させた場合の出力性能曲線を示す．翼型はNACA0018，コード長はc=0.15mである．風車単体では，翼枚数が少ない2枚翼風車の方が，高周速比側で出力のピークをとり，3枚翼風車よりも高い出力性能を示した．風レンズを適用すると，この風車単体の特性を維持したまま，各々の場合に対して出力増加が得られ，結果として風車単体に対し1.9～2.0倍の出力増加が得られた．

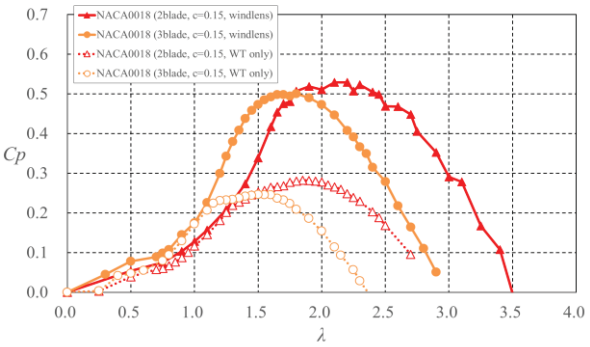

Fig.10 Comparison of power coefficients C_p of wind-lens turbines between two blades and three blades.
(Wind-lens: L=1.14D, h=0.5D, ϕ=15°)

5.2 翼厚を変化させた場合

Fig.11に翼の厚みを変化させた場合の出力性能曲線を示す．翼型はNACA0012，NACA0018，NACA0024，NACA0030を使用した．翼枚数は2枚，コード長はc=0.15mである．翼が厚くなるに伴い，最大出力をとる周速比は小さくなるが，出力が最大となるのはNACA0024の翼型を用いた場合であった．この特性は風レンズを適用した場合も同様であり，風レンズを適用した場合，風車単体に対して1.9～2.2倍の出力増加が得られた．

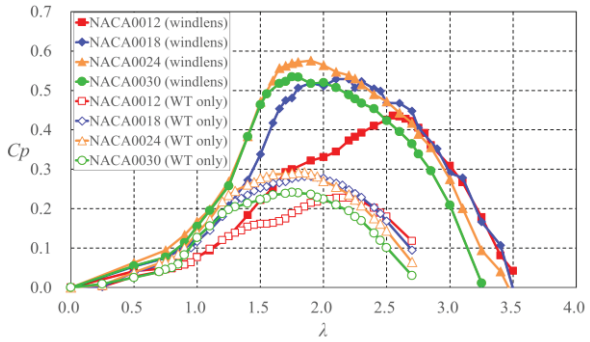

Fig.11 Power coefficients C_p of wind turbines with various thickness airfoil *vs.* tip-speed ratio λ.
(Wind-lens: L=1.14D, h=0.5D,φ=15°)

5.3 翼のコード長を変化させた場合

Fig.12に翼のコード長を変化させた場合の出力性能曲線を示す．翼型はNACA0024，翼枚数は2枚，コード長はc=0.10m，及び0.15mである．風車単体の場合，最大出力に変化はなかったが，コード長を短くした場合，最大出力をとる周速比は，高周速比側に移動した．この特性は風レンズを適用した場合も同様であり，結果として風レンズを適用した場合，風車単体に対して2.0倍の出力増加が得られた．

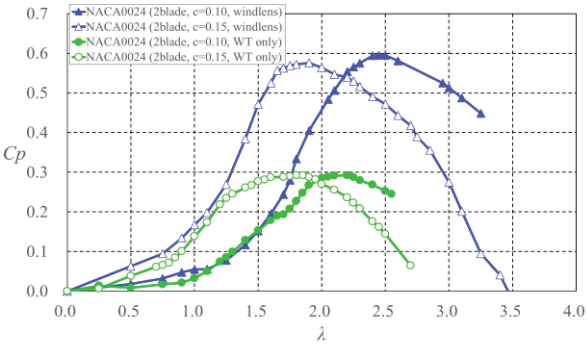

Fig.12 Comparison of power coefficients Cp of wind-lens turbines with different chord length.
(Wind-lens: L=1.14D, h=0.5D,φ=15°)

5.4 ソリディティが同じで翼枚数が異なる場合

Fig.13に，風車単体のソリディティσ(=2Nc/D_{wt}，Nは風車のブレード枚数)を維持し,N及びcを変化させた場合の出力曲線を示す.N=2の場合はc=0.15m,N=3の場合はc=0.10mとした．ソリディティはσ≒0.86である．風車単体の場合，翼枚数を増やすと出力は低周速比側で低下した．風レンズを適用した場合も同様の傾向であり，風レンズの適用による最大出力の増加は，2.0～2.1倍であった．

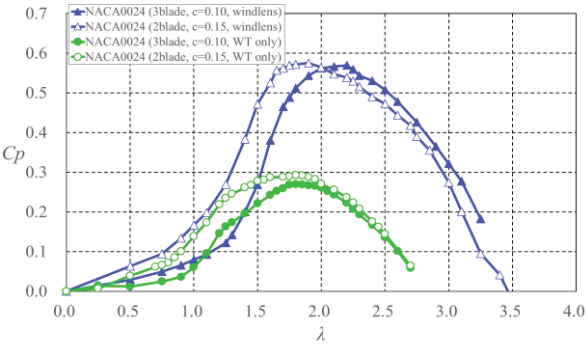

Fig.13 Comparison of power coefficients C_p of wind-lens turbines with same solidity, and different blade number. (Wind-lens: L=1.14D, h=0.5D,φ=15°)

6. 出力性能のレイノルズ数依存性

最後に，出力性能実験において実験風速を変化させ，レイノルズ数が変化した場合の出力変化について調べた．

実験はU_0＝6，8，10m/sで行い，翼コード長c=0.15mを代表長さとすると，レイノルズ数はそれぞれRe≒6.0×10^4，8.0×10^4，10.0×10^4である．また，実験には対称翼であるNACA0018の他に，NACA0018の翼中央線に曲率R(=D_{wt}/2)をもたせた円弧翼も用いた．風レンズは4章と同じ曲面型タイプを用いた．

Fig.14，Fig.15にそれぞれの翼型に対する出力曲線を示す．風車単体の最大出力については，対称翼の方が高い出力が得られた．円弧翼については，最大出力は対称翼に及ばないが，広い周速比領域にわたって出力を維持する特性があることが分かった．出力性能のレイノルズ依存性も，翼型により差異がみられる．円弧翼の場合，レイノルズ数が大きくなるにつれて出力は高くなるが，対称翼の場合は，Re≒8.0×10^4以上で出力増加は頭打ちとなった．

風レンズを適用した場合も，翼型の違いによる出力特性の差が風車単体と同様に現れつつ，最大出力は風車単体の2.1～2.2倍に増加した．これに伴い，風車単体でみられたレイノルズ数依存性は，風レンズの適用による出力増加に応じて拡大した．すなわち，風レンズ適用風車の出力は，風車単体よりもレイノルズ数に大きく依存するため，出力が高く，かつレイノルズ数依存性の低い風車を選定することが安定して高い出力を得るためには重要である，と言える．

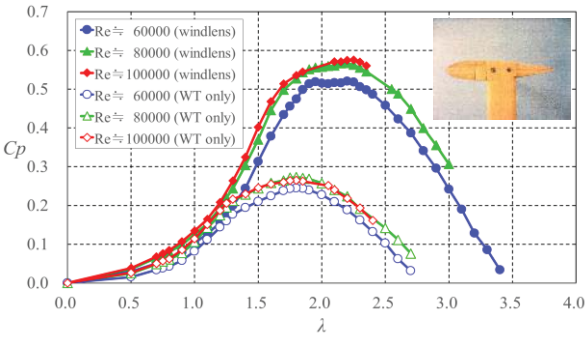

Fig.14 Comparison of power coefficients C_p of wind-lens turbines with various Reynolds number.
(Airfoil : NACA0018, symmetric
Wind-lens : Curved surface type diffuser)

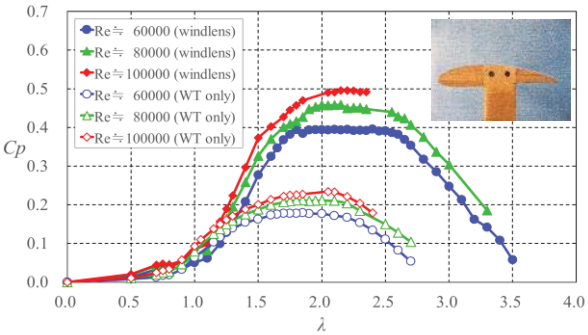

Fig.15 Comparison of power coefficients C_p of wind-lens turbines with various Reynolds number.
(Airfoil : NACA0018, arc-shaped
Wind-lens : Curved surface type diffuser)

7. 結 論

水平軸型風車用に開発が進められてきた風レンズを直線翼垂直軸型風車に適用して風洞にて出力性能実験を行い，出力増加効果を調べた．

最初に，どのような形状の風レンズが効果的に出力増加を達成するかをパラメトリックスタディにより調べた．その結果，ディフューザ開き角やつばの幅を大きくするほど出力は増加した．また，主流方向の風レンズの大きさ（投影面積）が同じ場合，つばの幅やディフューザ長さを大きくするよりも，ディフューザ開き角を大きくした方が，より広い周速比領域にて高い出力が得られることが分かった．ただし，開き角には出力増加に最適な上限値がある．インレットは，高い出力を広い周速比領域にわたって発揮することに寄与する．また，風レンズのスロート部は風車中心に位置させると最も効果的に出力増加が得られることが分かった．加えて，ディフューザを曲面型にすると，平面型ディフューザよりも高い出力が得られる．曲面型ディフューザの風レンズを適用した場合，風車単体の2.1倍の出力増加が得られた．

次に，翼枚数，翼型，翼コード長などの風車形状を変化させて出力を測定したが，風車の形状が変化しても風レンズの効果は同様に得られることが分かった．

最後に，出力性能のレイノルズ数依存性について調査したが，風レンズを適用した場合，風車単体のレイノルズ数依存性が出力増加に伴い拡大されるため，レイノルズ数依存性の小さな風車を選定することが望ましいことが分かった．

参考文献

1) 大屋裕二，烏谷隆，桜井晃，井上雅弘：つば付きディフューザ風車による風力発電の高出力化－第2報－，日本航空宇宙学会論文集 Vol.52, No.604, (2004) 210 - 213
2) Ohya, Y. and Karasudani, T.: A Shrouded Wind Turbine Generating High Output Power with Wind-lens Technology, Energies, Vol.3, (2010) 634-649
3) Ohya, Y., Uchida, T., Karasudani, T., Hasegawa, M. and Kume H.: Numerical Studies of Flow around a Wind Turbine Equipped with a Flanged-Diffuser Shroud using an Actuator-Disk Model, Wind Engineering, Vol.36, (2012) 455-472
4) 高橋修平，濵田純一，大屋裕二，烏谷隆，渡辺公彦：垂直軸型風車に適した翼型の検討と集風体の適用による出力性能の向上，第19回風工学シンポジウム論文集，(2006) 169-174